

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Separální ohřívák vody Flexibilního energetického systému u
bioplynové stanice VÍTKOVICE

Separative Water Heater for Flexible Energy System of Biogas Station
VÍTKOVICE

Student:
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Michal Gawlas
doc.Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Gawlas**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Separální ohřívák vody Flexibilního energetického systému u
bioplynové stanice VÍTKOVICE**
**Separative Water Heater for Flexible Energy System of Biogas Station
VÍTKOVICE**

Zásady pro vypracování:

Navrhněte separální ohřívák vody pro výše uvedený FES.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Rešerši FES zaměřenou na využití odpadního tepla
2. Základní výpočty složení spalín a entalpie za motory TEDOM
3. Potřebné výpočty parovzduchové směsi
4. Bilanční výpočty pro zadaný typ mikroturbíny
5. Výpočtový projekt separálního ohříváku vody
6. Analýza chování výměníku při nižších výkonech

Základní parametry:

Jednotky TEDOM:

Výkon	4x165 kW
Množství spalín	1,045 kg/s
Teplota spalín	580 °C
Tlak spalín	105 165 Pa

Plynová turbína:

Množství na vstupu	1,166 kg/s
Teplota na vstupu	500 °C
Tlak na vstupu	4,3 bar

Seznam doporučené odborné literatury:

VILIMEC, L. *Kotle I.* Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2002. 116 s. ISBN 80 - 248 - 0076 - 4
VILIMEC, L. *Kotle II.* Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1999. 150 s. ISBN 80 - 7078 - 681 - 7
Firemní podklady VÍTKOVICE POWER ENGINEERING.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry

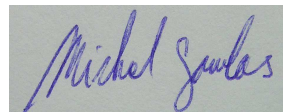


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2010

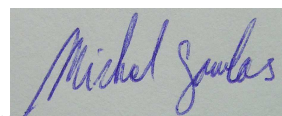
A rectangular box containing a handwritten signature in blue ink. The signature appears to read "Michel Soules".

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: ...20.5.2010...



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Michal Gawlas

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Orlová – Lutyně, K Zimovudce 212

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GAWLAS, M. Separální ohřívák vody (SeOV) Flexibilního energetického systému (FES) u bioplynové stanice VÍTKOVICE a.s.: diplomová práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 50 s., Vedoucí doc.Ing. Ladislav Vilimec.

Diplomová práce je zaměřená na návrh separálního ohříváku vody, který je součástí Flexibilního energetického systému jež má být aplikován do stávající bioplynové stanice Vítkovice v Pustějově. Diplomová práce obsahuje rešerši zaměřenou na Flexibilní energetický systém a výše zmiňovanou bioplynovou stanici, dále výpočet vlastností spalín za kogeneračními jednotkami TEDOM, bilanční výpočty Flexibilního energetického systému a návrh samotného separálního ohříváku vody. Příloha obsahuje výkresovou dokumentaci navrženého tepelného výměníku a výpočtový matematický model flexibilního energetického systému.

ANNOTATION OF BACHELOR WORK

GAWLAS, M. Separative Water Heater for Flexible Energy System of Biogas Station VÍTKOVICE: Diploma Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2010, 50 p., Supervisor: doc. Ing. Ladislav Vilimec.

The diploma thesis is dealing with the topic of suggestion of separative water heater which is a part of the flexible energy system and should be implemented in the existing biogas station Vítkovice in Pustějov. The thesis includes search aimed on flexible energy system and biogas station mentioned above, calculation of gas for cogeneration units TEDOM, balance calculations of the flexible power system and finally a design of the actual separation water heater. The supplement includes drawings of the designed heat exchanger and computational mathematical model of a flexible energy system.

Osnova:	strana:
1 ÚVOD	11
2 REŠERŠE	11
2.1 FES – Flexibilní energetický systém	11
2.2 BIOPLYNOVÁ STANICE VÍTKOVICE	14
3 ZADANÉ VÝPOČTOVÉ PARAMETRY	16
4 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY SPALIN	18
4.1 STECHIOMETRIE	18
4.2 ENTALPIE SPALIN	21
5 FES – BILANČNÍ VÝPOČTY	23
5.1 VÝPOČTOVÉ BODY	23
5.2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY	24
5.3 VSTŘIKY	27
5.4 MIKROTURBÍNA S KOMPRESOREM	28
6 NÁVRH SEPARAČNÍHO OHŘÍVÁKU VODY	31
6.1 NÁVRH ZE STRANY VODY	31
6.2 NÁVRH ZE STRANY PAROVZDUCHOVÉ SMĚSI	35
6.3 CELKOVÝ POČET SVAZKŮ TRUBEK	39
7 CHOVÁNÍ VÝMĚNÍKU PŘI NIŽŠÍM VÝKONU	43
8 ZÁVĚR	48
9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
10 SEZNAM PŘÍLOH	50

Seznam použitých symbolů a značek

Značka	Veličina	Jednotka
B	šířka kanálu	[m]
C_1	oprava na poměrnou délku	[1]
C_m	opravný koef. pro mezikruží	[1]
C_m	korekční součinitel na uspořádání svazku	[1]
CH_4	obsah metanu	[1]
CO	obsah oxidu uhelnatého	[1]
CO_2	obsah oxidu uhličitého	[1]
C_t	opravný koef. závislý na teplotě	[1]
C_z	korekční součinitel na počet řad	[1]
c_p	měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
D	vnější průměr trubky	[mm]
d	vnitřní průměr trubky	[mm]
d	měrná vlhkost vzduchu	[kg·kg ⁻¹]
d_e	ekvivalentní průměr	[m]
FES	flexibilní energetický systém	
G	elektrický generátor	
H	výška kanálu	[m]
h	entalpie	[kJ·kg ⁻¹]
ChPVS	chladič parovzduchové směsi	
KV	kouřový ventilátor	
k	součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
L	délka trubky	[m]
MPO	ministerstvo průmyslu a obchodu	
\dot{m}	hmotnostní tok	[kg·s ⁻¹]
N_2	obsah dusíku	[1]
NN	napájecí nádrž	
n	přebytek vzduchu, počet trubek	[1]
n_1	počet trubek v příčném směru	[1]
n_2	počet trubek v podélném směru	[1]
O	objem složky ve spalínách	[m ³ _N · m ⁻³ _N]
O ₂	obsah kyslíku	[1]
OPVS	ohřívač parovzduchové směsi	

OSV	ohřívač spalovacího vzduchu	
P	příkon, výkon	[kW]
Pa	palivo	
PLT	plynová turbína	
Pr	prandtlovo číslo	[1]
PVG	parovzduchový generátor	
p	tlak absolutní	[Pa]
p	počet svazků trubek	[1]
p _N	normální tlak 101 325 Pa	[Pa]
p _{vs}	parovzduchová směs	
Q	tepelný výkon	[kW]
q	tepelný tok	[W·m ⁻²]
RgV	regenerační výměník	
S	průtočná plocha, plocha	[m ²]
S ₁	průtočná plocha jedné trubky	[m ²]
SeOV	separační ohřívač vody	
s ₁	rozteč trubek v příčném směru	[1]
s ₂	rozteč trubek v podélném směru	[1]
T	tloušťka stěny trubky	[mm]
TA	tepelný agregát	
t	teplota	[°C]
\dot{V}	objemový průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
VPE	Vítkovice power engineering	
VV	vzduchový ventilátor	
vz	vzduch	
w	koncentrace, rychlost proudění	[1], [m·s ⁻¹]
X	objemový podíl	[1]
Y	celkový příčný rozměr svazku trubek	[m]
Z	velikost mezery	[m]
α	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
χ	součinitel vlhkého vzduchu	[1]
Δ	rozdíl, přírůstek	[kJ·kg ⁻¹], [°C]
ε _K	kompresní poměr kompresoru	[1]
ε _T	expanzní poměr turbíny	[1]
η	dynamická viskozita	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]

η_K	účinnost kompresoru	[1]
η_T	účinnost turbíny	[1]
φ	relativní vlhkost vzduchu	[1]
Φ_σ	parametr pro uspořádání svazku trubek	[1]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
σ_1	poměrná příčná rozteč	[1]
σ_2	poměrná podélná rozteč	[1]
σ'_2	poměrná uhlopříčná rozteč	[1]
ψ	opravný součinitel podle překřížení proudu	[1]

Seznam dolních indexů

Index	Význam
bar	barometrický
CO ₂	oxid uhličitý
CS-AMH	ohřívač parovzduchové směsi
H ₂ O	voda, vodní pára
HW	ohřívač vody
K	kompresor
korig	korigovaná hodnota
m	menší
min	stechiometrický stav
N	normální podmínky
N ₂	dusík
O ₂	kyslík
obj	objemové jednotky
PR	průtočný průřez
pvs	parovzduchová směs
RHE	rekuperační výměník
SeOV	separační ohřívač vody
SP	spaliny
SS	spaliny suché
ST	stěna trubky
SV	spaliny vlhké

stř	střední hodnota
T	turbína, trubka
V	voda
v	větší
VP	vodní pára
VS	vzduch suchý
VV	vlhký vzduch
Z	ztráta

1 ÚVOD

Tématem mé diplomové práce je „Separační ohřívač vody Flexibilního energetického systému u bioplynové stanice VÍTKOVICE.“ Separační ohřívač vody (SeOV) je výměník tepla, který ohřívá vodu potřebnou pro ohřev substrátu ve fermentoru, z kterého je získáván bioplyn pro kogenerační jednotky TEDOM. Tyto jednotky produkují horké spaliny, jež poslouží jako vstupní energie pro vyvíjený Flexibilní energetický systém (FES). Mnou navrhovaný SeOV je jeden z tepelných výměníků, jež jsou ve Flexibilním energetickém systému obsaženy. FES vyvíjí VÍTKOVICE POWER ENGINEERING (VPE) za účelem dosáhnout vyšší účinnosti při transformaci primární energie paliv na elektrickou energii.

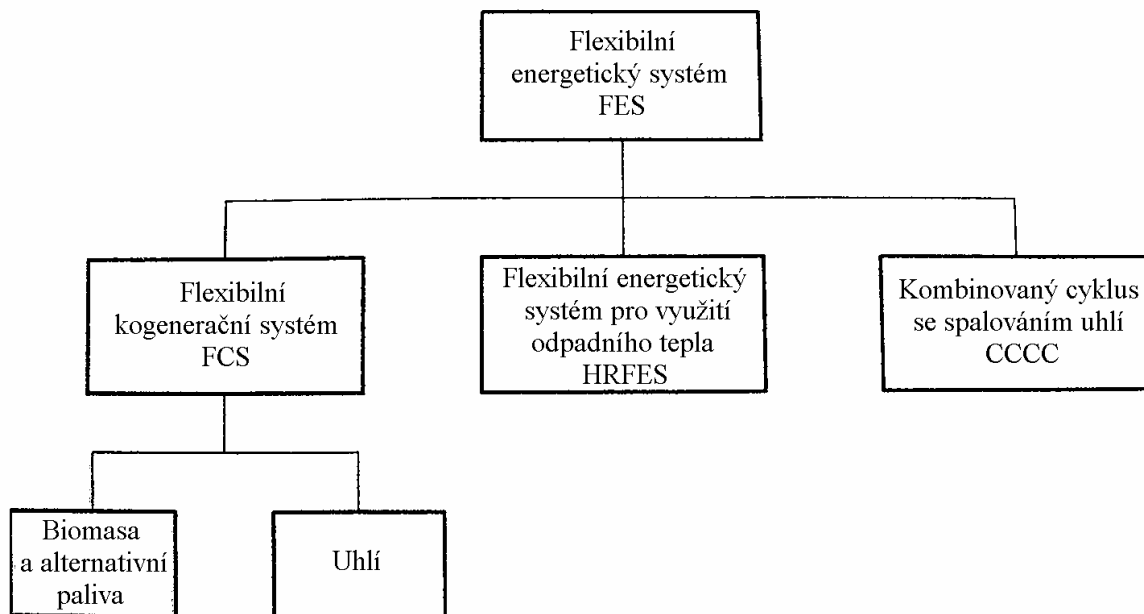
2 REŠERŠE

2.1 FES – Flexibilní energetický systém

FES – je flexibilní energetický systém, který pro transformaci primární energie paliv na energii elektrickou s využitím Braytonova nebo kombinovaného Braytonova a Rankinova-Clausiova cyklu využívá technologii jejich spalování. Zjednodušeně můžeme FES popsat jako vlhký oběh s plynovou turbínou s nepřímým ohřevem pracovního média, kterým v nejjednodušších případech je směs vzduchu a vodní páry - stručně parovzduchová směs(1).

Z hlediska dopadu na životní prostředí je FES srovnatelný s dnes používanými nebo vyvíjenými technologiemi pro spalování tuhých paliv. Při spalování se vzduchem jsou emise stejné jako u stávajících kotlů spalujících tatáž paliva, lze použít i vyvíjený tzv. bezemisní cyklus, pokud se pro spalování použije kyslík(1).

Základní myšlenka - využít klasickou technologii spalování pro transformaci primární energie tuhých paliv (uhlí, biomasa, alternativní paliva) a plyných a kapalných paliv (nevhodných pro spalování v plynových motorech) na tepelnou energii parovzduchové směsi, jakožto pracovního média s parametry vhodnými pro pohon plynové turbíny - je v principu využitelná u všech používaných energetických systémů(1), schématicky jsou možnosti naznačeny na obr. 2.1 [1].



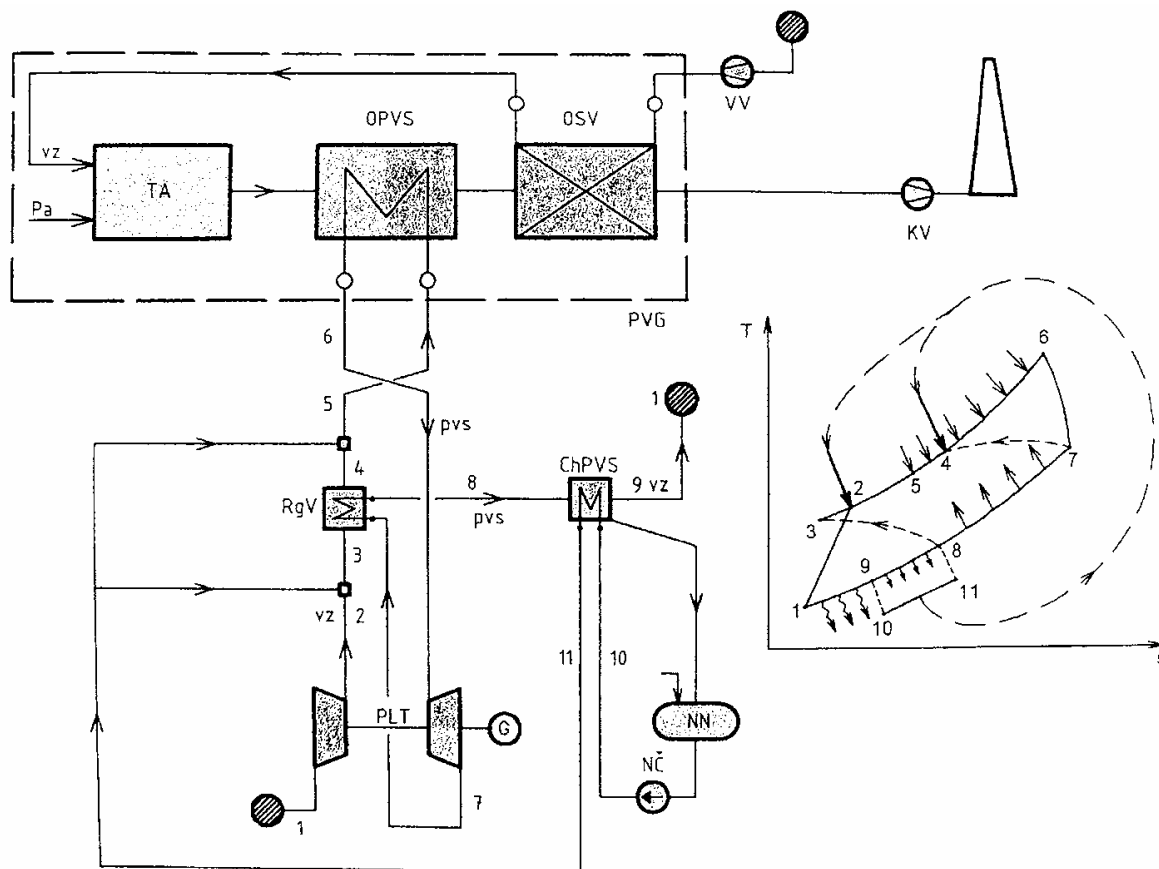
Obr. č.2.1 Možnosti využití FES

FCS - je flexibilní kogenerační systém (Flexible Cogeneration System) využívající uhlí, biomasu i alternativní paliva a je zaměřen na jednotky nižších výkonů.

HRFES - je energetický systém využívající teplo odpadních plynů (Heat Recovery Flexible Energy System), např. za různými tepelnými agregáty v hutích.

CCCC - je kombinovaný paroplynový cyklus se spalováním uhlí (Coal Combustion Combi Cycle) pro elektrárenské bloky nejvyšších výkonů

Flexibilní energetický systém pro využití odpadního tepla **HRFES** lze aplikovat u různých tepelných agregátů pro využití jejich odpadního tepla k výrobě elektřiny, případně ke kogenerační výrobě energie. V tomto případě platí, že dodávka elektřiny není vázána na dodávku tepla(1). Možné schéma zapojení je znázorněno na obr. č.2.2 [1].



Obr. č.2.2 Zapojení pro využití odpadního tepla

LEGENDA:

ChPVS	- chladič parovzd. směsi	PVG	- parovzduchový generátor
KV	- kouřový ventilátor	pvs	- parovzduchová směs
NN	- napájecí nádrž	RgV	- regenerační výměník
OPVS	- ohřívák parovzd. směsi	TA	- tepelný agregát
OSV	- ohřívák spal. vzduchu	VV	- vzduchový ventilátor
Pa	- palivo	vz	- vzduch
PLT	- plynová turbína		

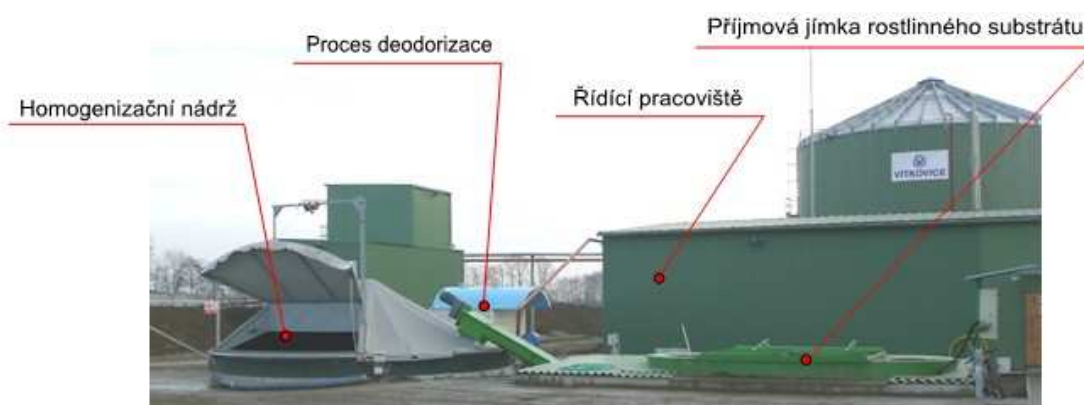
Vzduch na výstupu z kompresoru plynové turbíny PLT se ochladí vstřikem kondenzátu 11 na vstupní teplotu 3 do regeneračního výměníku RgV a vzniklá parovzduchová směs pvs se po ohřátí v RgV na teplotu 4 opět vstřikem kondenzátu 11 ochladí na vstupní teplotu 5 parovzduchové směsi do ohříváku parovzduchové směsi OPVS. V tomto se ohřeje spaliny z tepelného agregátu TA na pracovní teplotu 6 parovzduchové směsi plynové turbíny PLT a po expanzi se parovzduchová směs o teplotě 7 ochladí v regenerativním výměníku RgV na

výstupní teplotu 8, která se dále v chladiči parovzduchové směsi ChPVS sníží na výstupní teplotu 9 a vypouští se do ovzduší. Jako chladicí médium v ChPVS se použije vstříkovaný kondenzát 11.

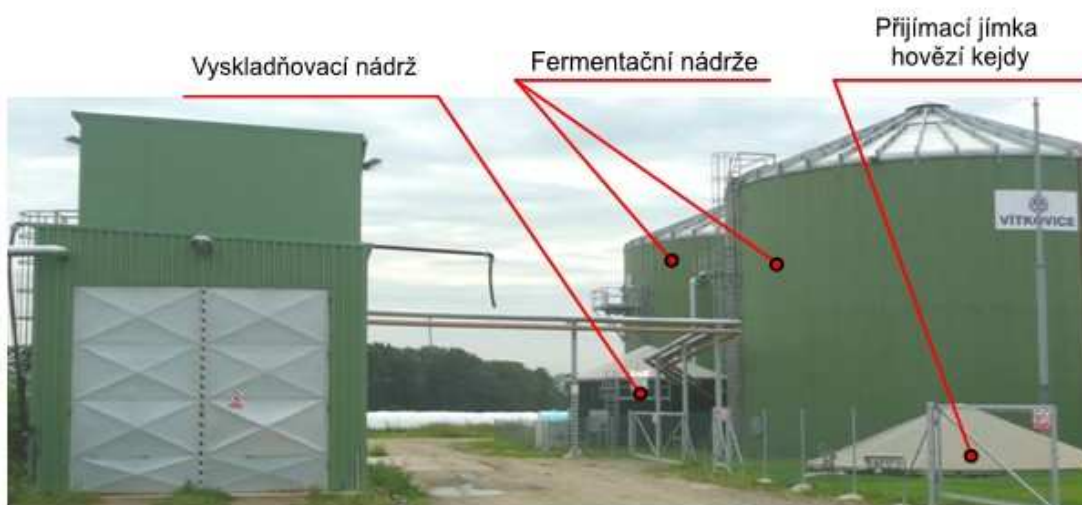
Pokud má TA odparné chlazení, tak vyrobená sytá pára se v oběhu využije, smíchá se s parovzduchovou směsí před nebo za regenerativním výměníkem RgV(1).

2.2 BIOPLYNOVÁ STANICE VÍTKOVICE

Bioplynová stanice VÍTKOVICE se nachází v Pustějově na Novojičínsku. Provozovatelem této bioplynové stanice je společnost ZEMSPOL STUDÉNKA a.s. Zpracovávají se v ní nejčastěji různé rostlinné materiály (např. kukuřičná nať, travní senáž, řepné řízky) a hovězí kejda. Komplex bioplynové stanice je zobrazen na následujících dvou obrázcích 2.3 a 2.4 [5].



Obr. č.2.3 Pohled 1 na komplex bioplynové stanice v Pustějově



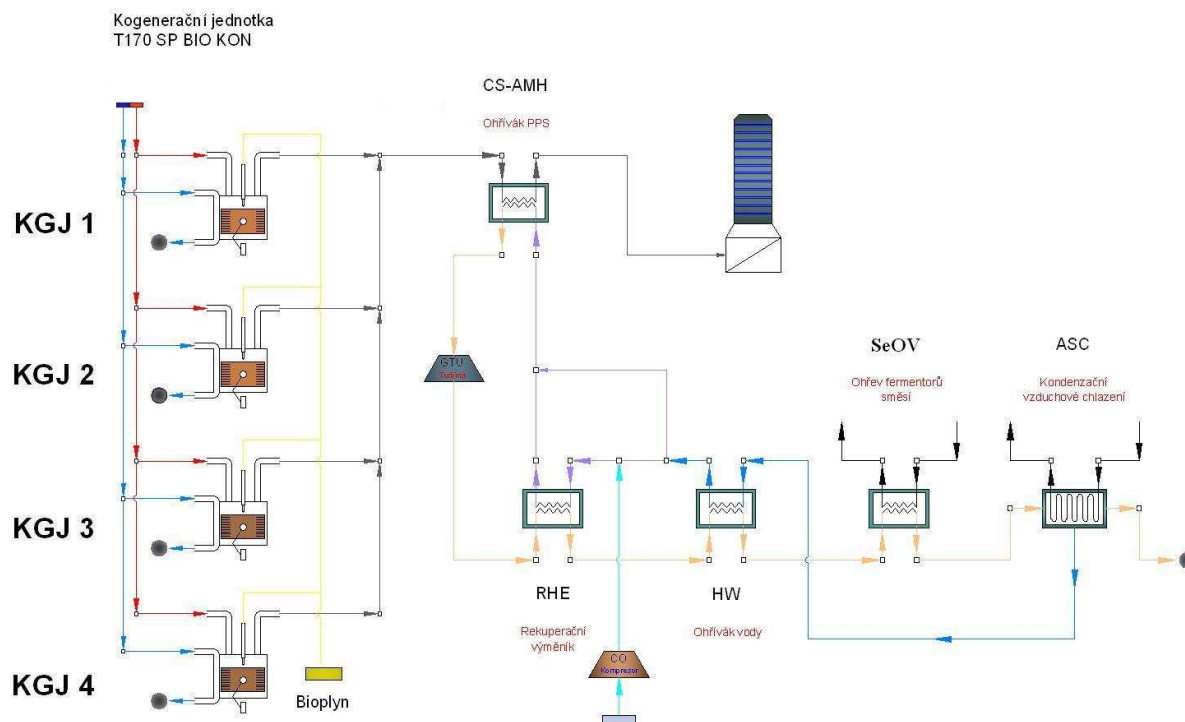
Obr. č.2.4 Pohled 2 na komplex bioplynové stanice v Pustějově

Bioplyn je získáván ve dvou fermentorech zapojených sériově, ve kterých probíhá mokrá fermentace a anaerobní kvašení. Produkovaný bioplyn je využit ve čtyřech kogeneračních jednotkách firmy TEDOM v provedení Cento 2 x T170 SP BIO KON. Jedná se o soustrojí motor generátor v kontejnerovém provedení, jak je vidět na obrázku č.2.5 [5].



Obr. č.2.5 Kontejnerové provedení kogeneračních jednotek

Teplo odvedené chlazením motoru je využito na ohřev např. fermentorů a homogenizační jímky. Horké spaliny poslouží jako zdroj energie pro vyvíjený FES. Blokové schéma FES je zobrazeno na následujícím obrázku č.2.6 [4] a kvůli přehlednosti umístěno i v příloze ve větším rozlišení.



Obr. č.2.6 Schéma FES

3 ZADANÉ VÝPOČTOVÉ PARAMETRY

Protože v průběhu zpracování diplomové práce řešitel (VPE) upravil některé parametry integrovaného zdroje, musel jsem aktualizovat některé parametry diplomové práce, tak aby bilanční výpočty zadaného schéma odpovídali konečnému provedení dle VPE.

Základní parametry:

Jednotky TEDOM:

Výkon	4x181,5	[kW]
Množství spalin	1,24	[kg·s ⁻¹]
Teplota spalin	600	[°C]
Tlak spalin	105 165	[Pa]

Plynová turbína:

Množství na vstupu	1,291	[kg·s ⁻¹]
Teplota na vstupu	529,8	[°C]
Tlak na vstupu	4,206	[bar]

Zadané parametry medií ve výpočtových bodech:

výpočtový bod	t	p	h	\dot{m}	w
	[°C]	[Pa]	[kJ·kg ⁻¹]	[kg·s ⁻¹]	[1]
30	600	105000		1,24	-
31	529,8	420600		1,291	0,1181
32					
33					
34					
35	143,3	103400			-
38	100	-		0,09909	-
39	100	438500		1,192	0,04472
40		-			-
41	15	101325		1,139	-
42					-
43					
44		-			-
45	30,77	-			-
46	50	150000			-
47		102200			
48	47	148700		7,835	-
49					

Tab. č.3.1 Zadané parametry medií

Další upřesňující parametry:

relativní vlhkost vzduchu	$\varphi = 0,6$	[1]
přebytek vzduchu	$n = 1,54$	[1]
tlak okolního vzduchu	$p_{\text{bar}} = 101\,325$	[Pa]
normální tlak	$p_N = 101\,325$	[Pa]
expanzní poměr	$\varepsilon_T = 3,96$	[1]
účinnost turbíny	$\eta_T = 0,8296$	[1]
kompresní poměr	$\varepsilon_K = 4,349$	[1]
účinnost kompresoru	$\eta_K = 0,8$	[1]

Složení bioplynu:

$CH_4 = 0,6$	[1]	$CO_2 = 0,3817$	[1]
$N_2 = 0,0148$	[1]	$O_2 = 0,0035$	[1]

4 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY SPALIN

4.1 STECHIOMETRIE

Výpočet podle [6]

Minimální objem kyslíku potřebný k dokonalému spálení 1 m³ plynu:

$$O_{O_2 \min} = 0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right] \quad (4.1)$$

$$O_{O_2 \min} = \sum \left(1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 0,6 - 0,0035 \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

$$O_{O_2 \min} = \underline{1,196} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

Stechiometrické množství suchého vzduchu:

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{0,21} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right] \quad (4.2)$$

$$O_{VS \min} = \frac{1,196}{0,21} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

$$O_{VS \min} = \underline{5,698} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

Součinitel vlhkého vzduchu:

$$\chi = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_{bar} - \varphi \cdot p''} \quad [1] \quad (4.3)$$

p'' [Pa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu. Ten je pro zadanou teplotu $p'' = 1782,25$ [Pa]

$$\chi = 1 + 0,6 \cdot \frac{1782,25}{101325 - 0,6 \cdot 1782,25} \quad [1]$$

$$\chi = \underline{1,011} \quad [1]$$

Stechiometrické množství vlhkého vzduchu:

$$O_{VV \min} = \chi \cdot O_{VS \min} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right] \quad (4.4)$$

$$O_{VV \min} = 1,011 \cdot 5,698 \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

$$O_{VV \min} = \underline{5,76} \quad \left[m_N^3 \cdot m_N^{-3} \right]$$

Stechiometrický objem vodní páry ve spalovacím vzduchu:

$$\begin{aligned} O_{VV,H_2O\min} &= (\chi - 1) \cdot O_{VS\min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.5) \\ O_{VV,H_2O\min} &= (1,011 - 1) \cdot 5,698 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{VV,H_2O\min} &= \underline{0,06267} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

Stechiometrický objem suchých spalín:

$$\begin{aligned} O_{CO_2} &= CO_2 + 0,994 \cdot (CO + \sum m \cdot C_m H_n) & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.6) \\ O_{CO_2} &= 0,3817 + 0,994 \cdot (1 \cdot 0,6) & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{CO_2} &= \underline{0,9781} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{N_2} &= N_2 + 0,7897 \cdot O_{VS\min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.7) \\ O_{N_2} &= 0,0148 + 0,7897 \cdot 5,698 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{N_2} &= \underline{4,514} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{SS\min} &= O_{CO_2} + O_{N_2} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.8) \\ O_{SS\min} &= 0,9781 + 4,514 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{SS\min} &= \underline{5,492} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

Stechiometrický objem vodní páry ve spalínách:

$$\begin{aligned} O_{SV,H_2O\min} &= H_2O + H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + O_{VV,H_2O\min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.9) \\ O_{SV,H_2O\min} &= \sum \frac{4}{2} \cdot 0,6 + 0,06267 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{SV,H_2O\min} &= \underline{1,263} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

Stechiometrický objem vlhkých spalín:

$$\begin{aligned} O_{SV\min} &= O_{SS\min} + O_{SV\min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.10) \\ O_{SV\min} &= 5,492 + 1,263 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\ O_{SV\min} &= \underline{6,755} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \end{aligned}$$

Skutečné množství suchého vzduchu:

$$\begin{aligned}
 O_{VS} &= n \cdot O_{VS \min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.11) \\
 O_{VS} &= 1,54 \cdot 5,698 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{VS} &= \underline{8,774} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Skutečné množství vlhkého vzduchu:

$$\begin{aligned}
 O_{VV} &= \chi \cdot O_{VS} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.12) \\
 O_{VV} &= 1,011 \cdot 8,774 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{VV} &= \underline{8,871} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Skutečný objem vodní páry ve spalovacím vzduchu:

$$\begin{aligned}
 O_{VV, H_2O} &= (\chi - 1) \cdot O_{VS} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.13) \\
 O_{VV, H_2O} &= (1,011 - 1) \cdot 8,774 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{VV, H_2O} &= \underline{0,0965} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Skutečný objem vodní páry ve spalínách:

$$\begin{aligned}
 O_{SV, H_2O} &= H_2O + H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + O_{VV, H_2O} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.14) \\
 O_{SV, H_2O} &= \sum \frac{4}{2} \cdot 0,6 + 0,0965 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{SV, H_2O} &= \underline{1,2965} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Skutečné množství suchých spalín:

$$\begin{aligned}
 O_{SS} &= O_{SS \min} + (n - 1) \cdot O_{VS \min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.15) \\
 O_{SS} &= 5,492 + (1,54 - 1) \cdot 5,698 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{SS} &= \underline{8,569} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Skutečné množství vlhkých spalín:

$$\begin{aligned}
 O_{SV} &= O_{SV \min} + (n - 1) \cdot O_{VV \min} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & (4.16) \\
 O_{SV} &= 6,755 + (1,54 - 1) \cdot 5,76 & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \\
 O_{SV} &= \underline{9,866} & [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] &
 \end{aligned}$$

Objemové podíly ve spalínách:

$$X_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV}} \quad [1] \quad (4.17)$$

$$X_{CO_2} = \frac{0,9781}{9,866} \quad [1]$$

$$X_{CO_2} = \underline{0,09914} \quad [1]$$

$$X_{N_2} = \frac{N_2 + 0,7897 \cdot O_{VS}}{O_{SV}} \quad [1] \quad (4.18)$$

$$X_{N_2} = \frac{0,0148 + 0,7897 \cdot 8,774}{9,866} \quad [1]$$

$$X_{N_2} = \underline{0,7039} \quad [1]$$

$$X_{O_2} = \frac{(n-1) \cdot 0,2103 \cdot O_{VS \min}}{O_{SV}} \quad [1] \quad (4.19)$$

$$X_{O_2} = \frac{(1,54-1) \cdot 0,2103 \cdot 5,698}{9,866} \quad [1]$$

$$X_{O_2} = \underline{0,06559} \quad [1]$$

$$X_{H_2O} = \frac{O_{SV, H_2O}}{O_{SV}} \quad [1] \quad (4.20)$$

$$X_{H_2O} = \frac{1,2965}{9,866} \quad [1]$$

$$X_{H_2O} = \underline{0,131} \quad [1]$$

Musí platit, že:

$$X_{CO_2} + X_{N_2} + X_{O_2} + X_{H_2O} = 1 \quad [1] \quad (4.21)$$

$$0,09914 + 0,7039 + 0,06559 + 0,131 = 1,00003 \quad [1]$$

4.2 ENTALPIE SPALIN

Pomocí programu EES jsem získal hodnoty entalpií h [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] jednotlivých složek spalín pro zadanou teplotu spalín $t_{SP} = 600$ [$^{\circ}\text{C}$] a tlak spalín $p_{SP} = 105\,165$ [Pa].

$$h_{CO_2} = 626,7 \quad \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \right]$$

$$h_{N_2} = 646,7 \quad \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \right]$$

$$h_{O_2} = 595,9 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$h_{H_2O} = 3706 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Jelikož jsou získané hodnoty entalpie v jednotkách $[kJ \cdot kg^{-1}]$ nemohu je rovnou použít pro výpočet celkové entalpie spalin tak, že je rozdělím v poměru objemových podílů. V poměru objemových podílů mohu rozdělit entalpii jednotlivých složek v objemových jednotkách $[kJ \cdot m^{-3}]$. Tuto entalpii získám, pokud znám hustotu jednotlivých složek spalin při dané teplotě a tlaku. Hustotu jednotlivých složek jsem získal opět v programu EES.

$$\rho_{CO_2} = 0,6375 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{N_2} = 0,4058 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{O_2} = 0,4635 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{H_2O} = 0,2611 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Celková entalpie spalin v objemových jednotkách:

$$h_{SP,obj} = h_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} \cdot X_{CO_2} + h_{N_2} \cdot \rho_{N_2} \cdot X_{N_2} + h_{O_2} \cdot \rho_{O_2} \cdot X_{O_2} + h_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot X_{H_2O} \quad [kJ \cdot m^{-3}] \quad (4.22)$$

$$h_{SP,obj} = 626,7 \cdot 0,6375 \cdot 0,09914 + 646,7 \cdot 0,4058 \cdot 0,7039 + 595,9 \cdot 0,4635 \cdot 0,06559 +$$

$$3706 \cdot 0,2611 \cdot 0,131 \quad [kJ \cdot m^{-3}]$$

$$h_{SP,obj} = \underline{369,6} \quad [kJ \cdot m^{-3}]$$

Přepočet entalpie zpět na hmotnostní jednotky provedu pomocí celkové hustoty spalin:

$$\rho_{SP} = \rho_{CO_2} \cdot X_{CO_2} + \rho_{N_2} \cdot X_{N_2} + \rho_{O_2} \cdot X_{O_2} + \rho_{H_2O} \cdot X_{H_2O} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (4.23)$$

$$\rho_{SP} = 0,6375 \cdot 0,09914 + 0,4058 \cdot 0,7039 + 0,4635 \cdot 0,06559 + 0,2611 \cdot 0,131 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\rho_{SP} = \underline{0,4135} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Celková entalpie spalin v hmotnostních jednotkách:

$$h_{SP} = \frac{h_{SP,obj}}{\rho_{SP}} \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (4.24)$$

$$h_{SP} = \frac{369,6}{0,4135} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

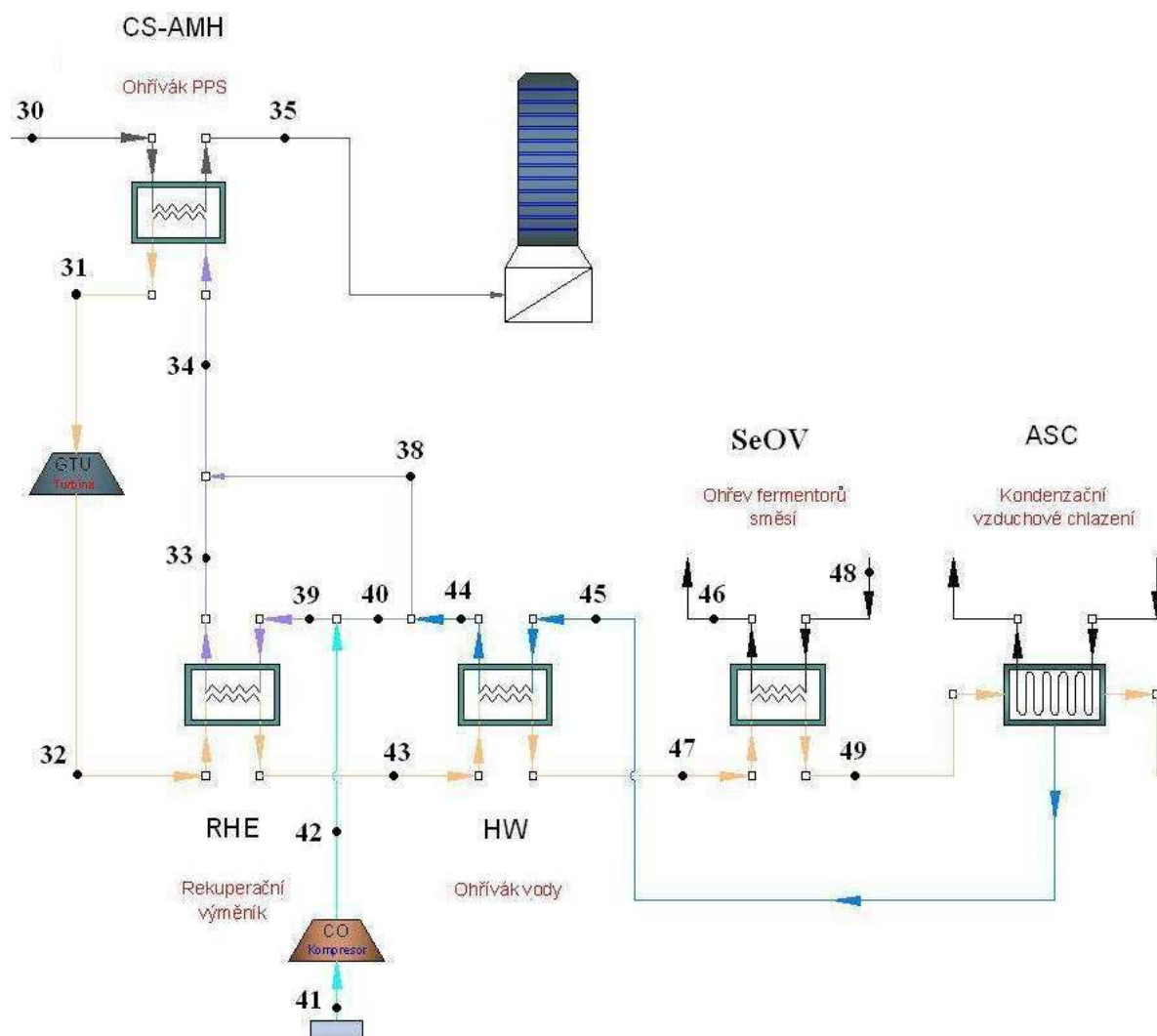
$$h_{SP} = \underline{893,7} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

5 FES – BILANČNÍ VÝPOČTY

V této kapitole popisují jednotlivá zařízení, ze kterých se Flexibilní Energetický Systém skládá.

5.1 VÝPOČTOVÉ BODY

Číslování výpočtových bodů matematického modelu jsem zvolil shodně s projektem prototypové jednotky integrovaného zdroje, který řeší VPE (VÍTKOVICE POWER ENGINEERING) v rámci projektu MPO [3], z důvodu snadného a rychlého porovnání výsledků. Výpočtové body jsou vyznačeny na následujícím obrázku 5.1.



obr. 5.1 Výpočtové body

5.2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Tepelný výkon výměníku tepla můžeme obecně určit jako sdělené teplo + tepelná ztráta sdílením tepla do okolí.

$$Q = \dot{m} \cdot (\Delta h) + Q_z \quad [kW] \quad (5.1)$$

kde Q $[kW]$ je tepelný výkon výměníku,

\dot{m} $[kg \cdot s^{-1}]$ je hmotnostní průtok média,

Δh $[kJ \cdot kg^{-1}]$ je rozdíl entalpií média na vstupu a výstupu z výměníku

Q_z $[kW]$ je tepelná ztráta sdílením tepla do okolí

Ve všech dalších výpočtech zanedbávám tepelnou ztrátu sdílením tepla do okolí Q_z $[kW]$,
potom lze výpočet zjednodušit na tvar:

$$Q = \dot{m} \cdot (\Delta h) \quad [kW] \quad (5.2)$$

Ohřívák parovzduchové směsi CS-AMH

$$Q_{CS-AMH} = \dot{m}_{30} \cdot (h_{30} - h_{35}) \quad [kW] \quad (5.3)$$

$$Q_{CS-AMH} = 1,24 \cdot (893,7 - 363,4) \quad [kW]$$

$$Q_{CS-AMH} = \underline{657,6} \quad [kW]$$

Rekuperační výměník RHE

$$Q_{RHE} = \dot{m}_{33} \cdot (h_{33} - h_{39}) \quad [kW] \quad (5.4)$$

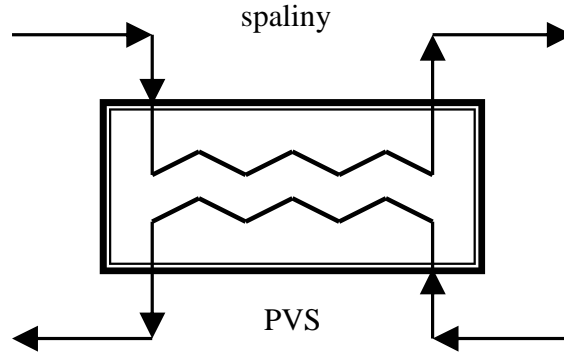
$$Q_{RHE} = 1,192 \cdot (414,5 - 363,4) \quad [kW]$$

$$Q_{RHE} = \underline{217,1} \quad [kW]$$

$$\begin{aligned} h_{30} &= 893,7 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{35} &= 105\,165 \quad [\text{Pa}] \\ t_{35} &= 600 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{30} &= 1,24 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{35} &= 363,4 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{35} &= 103\,400 \quad [\text{Pa}] \\ t_{35} &= 143,3 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{35} &= 1,24 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

CS-AMH



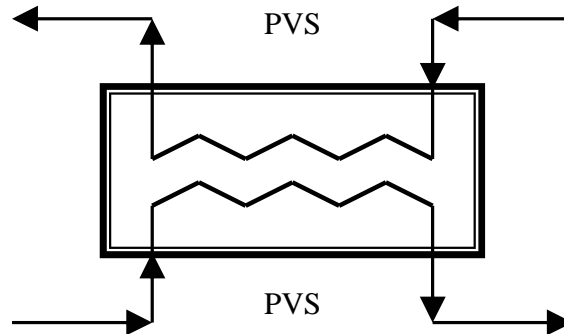
$$\begin{aligned} h_{31} &= 924,2 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{31} &= 420\,600 \quad [\text{Pa}] \\ t_{31} &= 529,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{31} &= 1,291 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{31} &= 0,1181 \quad [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{34} &= 414,9 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{34} &= 430\,600 \quad [\text{Pa}] \\ t_{34} &= 95,6 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{34} &= 1,291 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{33} &= 415,5 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{33} &= 438\,500 \quad [\text{Pa}] \\ t_{33} &= 269,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{33} &= 1,192 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{33} &= 0,0447 \quad [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{39} &= 363,4 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{39} &= 438\,500 \quad [\text{Pa}] \\ t_{39} &= 100 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{39} &= 1,192 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{39} &= 0,04472 \quad [1] \end{aligned}$$

RHE

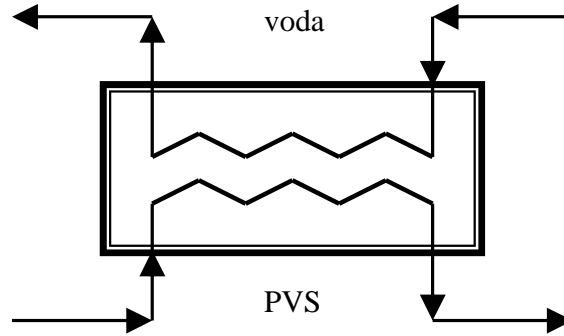


$$\begin{aligned} h_{32} &= 683,4 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{32} &= 106\,100 \quad [\text{Pa}] \\ t_{32} &= 329,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{32} &= 1,291 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{32} &= 0,1181 \quad [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{43} &= 515,2 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{43} &= 106\,100 \quad [\text{Pa}] \\ t_{43} &= 183,9 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{43} &= 1,291 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{43} &= 0,1181 \quad [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{44} &= 419,2 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ x_{44} &= 0 & [1] \\ t_{44} &= 100 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{44} &= 0,152 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{45} &= 129 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ x_{45} &= 0 & [1] \\ t_{45} &= 30,77 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{45} &= 0,152 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$



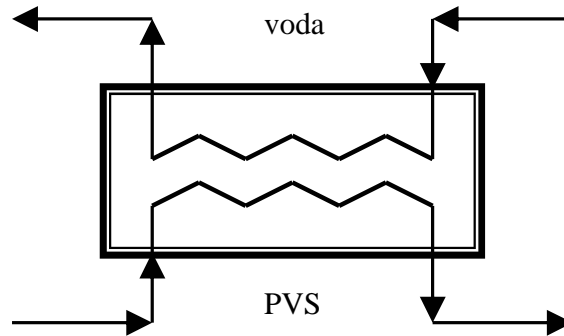
$$\begin{aligned} h_{43} &= 515,2 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{43} &= 106\,100 & [\text{Pa}] \\ t_{43} &= 183,9 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{43} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{43} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{47} &= 481 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{47} &= 102\,200 & [\text{Pa}] \\ t_{47} &= 153,7 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{43} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{43} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{46} &= 209,4 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{46} &= 150\,000 & [\text{Pa}] \\ t_{46} &= 50 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{46} &= 7,835 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

SeOV

$$\begin{aligned} h_{48} &= 196,8 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{48} &= 148\,700 & [\text{Pa}] \\ t_{48} &= 47 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{48} &= 7,835 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} h_{47} &= 481 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{47} &= 102\,200 & [\text{Pa}] \\ t_{47} &= 153,7 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{47} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{47} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{49} &= 404,8 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{49} &= 101\,700 & [\text{Pa}] \\ t_{49} &= 86,04 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{49} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{49} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$

Ohřívák vody HW

$$\dot{Q}_{HW} = \dot{m}_{44} \cdot (h_{44} - h_{45}) \quad [kW] \quad (5.5)$$

$$\dot{Q}_{HW} = 0,1524 \cdot (419,2 - 129) \quad [kW]$$

$$\dot{Q}_{HW} = \underline{44,23} \quad [kW]$$

Separční ohřívák vody SeOV

$$\dot{Q}_{SeOV} = \dot{m}_{48} \cdot (h_{46} - h_{48}) \quad [kW] \quad (5.6)$$

$$\dot{Q}_{SeOV} = 7,835 \cdot (209,4 - 196,8) \quad [kW]$$

$$\dot{Q}_{HW} = \underline{98,29} \quad [kW]$$

POZN.: U tepelného výměníku RHE a tepelného výměníku HW (pouze na straně vody) jsem zanedbal tlakovou ztrátu výměníku.

5.3 VSTŘIKY

energetická rovnováha $\dot{m}_{33} \cdot h_{33} + \dot{m}_{38} \cdot h_{38} = \dot{m}_{34} \cdot h_{34} \quad [kW] \quad (5.7)$

hmotová rovnováha $\dot{m}_{33} + \dot{m}_{38} = \dot{m}_{34} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (5.8)$

Bilance vstříku 1

$$h_{34} = 414,9 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$p_{34} = 430\,600 \quad [Pa]$$

$$t_{34} = 95,6 \quad [^{\circ}C]$$

$$\dot{m}_{34} = 1,291 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$w_{34} = 0,1181 \quad [1]$$

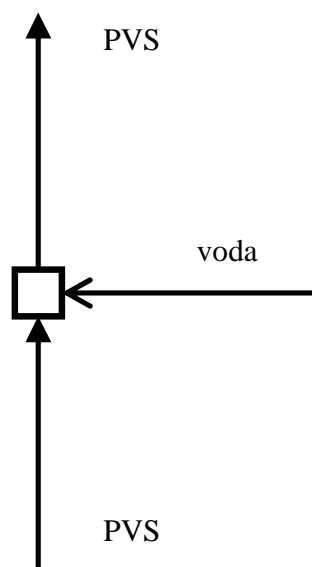
$$h_{33} = 415,5 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$p_{33} = 438\,500 \quad [Pa]$$

$$t_{33} = 269,8 \quad [^{\circ}C]$$

$$\dot{m}_{33} = 1,192 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$w_{33} = 0,0447 \quad [1]$$



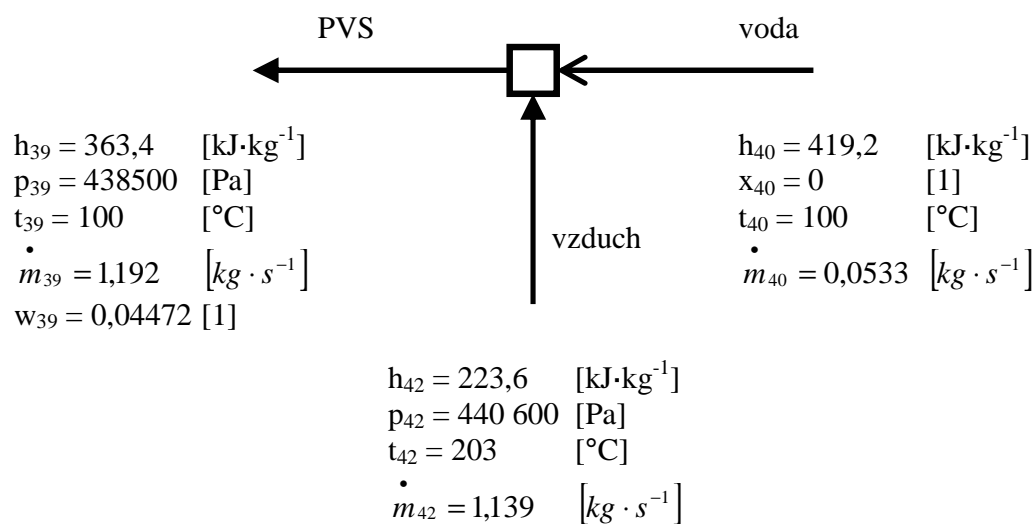
$$h_{38} = 419,2 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$x_{38} = 0 \quad [1]$$

$$t_{38} = 100 \quad [^{\circ}C]$$

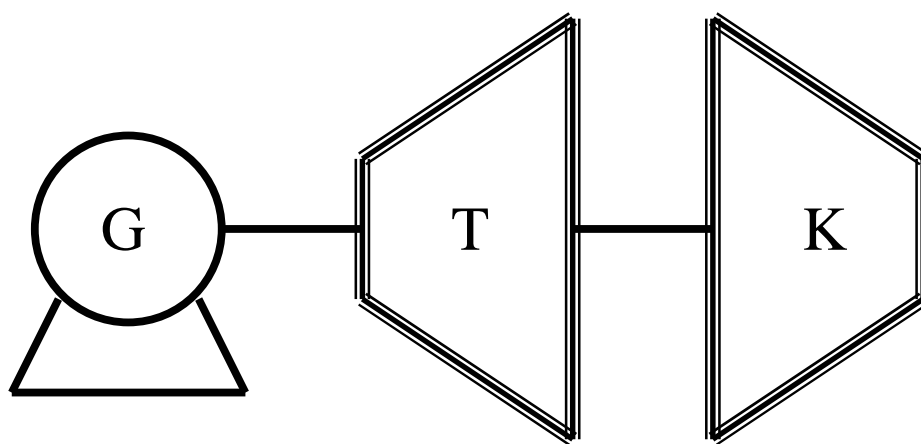
$$\dot{m}_{34} = 0,0991 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

Bilance vstřiku 2



5.4 MIKROTURBÍNA S KOMPRESOREM

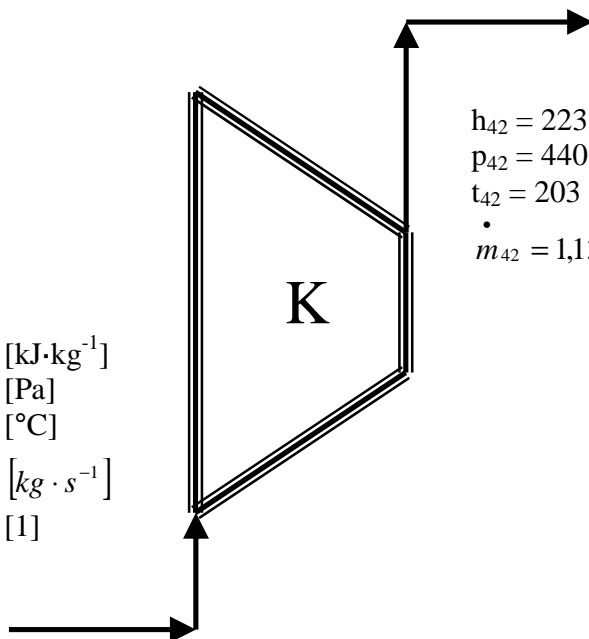
Pro matematický model a výpočtové schéma jsou kompresor i turbína počítány samostatně, ve skutečnosti se jedná o jedno zařízení (jeden celek), jak je schematicky zobrazeno na obr. 5.2.



obr. 5.2 Schéma turbosoustrojí – mikroturbína – kompresor - generátor

Kompresor

$$\begin{aligned} h_{41} &= 25,5 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{41} &= 101\,325 & [\text{Pa}] \\ t_{41} &= 15 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{41} &= 1,139 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ \phi_{42} &= 0,6 & [1] \end{aligned}$$



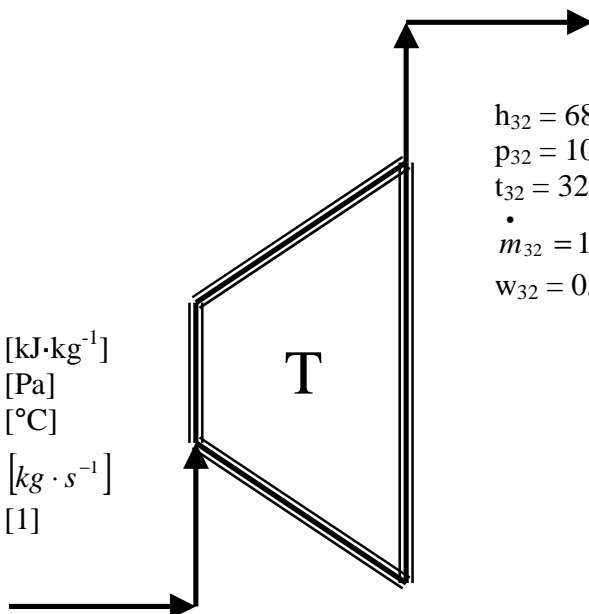
$$\begin{aligned} h_{42} &= 223,6 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{42} &= 440\,600 & [\text{Pa}] \\ t_{42} &= 203 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{42} &= 1,139 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Příkon kompresoru:

$$\begin{aligned} P_K &= \dot{m}_{41} \cdot (h_{42} - h_{41}) & [\text{kW}] & (5.9) \\ P_K &= 1,139 \cdot (223,6 - 25,5) & [\text{kW}] \\ P_K &= \underline{225,6} & [\text{kW}] \end{aligned}$$

Turbína

$$\begin{aligned} h_{31} &= 924,2 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{31} &= 420\,600 & [\text{Pa}] \\ t_{31} &= 529,8 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{31} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{31} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} h_{32} &= 683,4 & [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ p_{32} &= 106\,100 & [\text{Pa}] \\ t_{32} &= 329,8 & [^{\circ}\text{C}] \\ \dot{m}_{32} &= 1,291 & [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ w_{32} &= 0,1181 & [1] \end{aligned}$$

Výkon turbíny:

$$P_T = \dot{m}_{31} \cdot (h_{31} - h_{32}) \quad [kW] \quad (5.10)$$

$$P_T = 1,291 \cdot (924,2 - 683,4) \quad [kW]$$

$$P_T = \underline{310,9} \quad [kW]$$

Vypočtené i zadané parametry medií ve výpočtových bodech:

Zadané hodnoty jsou zvýrazněny tučně.

výpočtový bod	t	p	h	\dot{m}	w
	[°C]	[Pa]	[kJ·kg ⁻¹]	[kg·s ⁻¹]	[1]
30	600	105000	893,7	1,24	-
31	529,8	420600	924,2	1,291	0,1181
32	329,8	106100	683,4	1,291	0,1181
33	269,8	438500	414,5	1,192	0,04472
34	95,6	430600	414,9	1,291	0,1181
35	143,3	103400	363,4	1,24	-
38	100	-	419,2	0,09909	-
39	100	438500	232,3	1,192	0,04472
40	100	-	419,2	0,05331	-
41	15	101325	25,5	1,139	-
42	203	440600	223,6	1,139	-
43	183,9	106100	515,2	1,291	0,1181
44	100	-	419,2	0,1524	-
45	30,77	-	129,0	0,1524	-
46	50	150000	209,4	7,835	-
47	153,7	102200	481,0	1,291	0,1181
48	47	148700	196,8	7,835	-
49	86,04	101700	404,8	1,291	0,1181

Tab. č.5.1 Vypočtené i zadané parametry medií

6 NÁVRH SEPARAČNÍHO OHŘÍVÁKU VODY

Separální ohřívák vody (SeOV) je protiproudý tepelný výměník kde dochází k výměně tepla z parovzduchové směsi (pvs) do vody. Rozhodl jsem se, že budu řešit trubkový výměník, ten bývá nejčastěji tvořen svazkem trubek, uspořádaných buď jako klasický hadový systém případně vícehad, který je často využíván v kotlařské praxi, nebo jako trubky uchycené v trubkovnici. Od koncepce vícehadu jsem upustil, protože jsem byl často omezován minimálním poloměrem ohybu trubky a vycházely tak velké délky trubek a tím i celého výměníku. Zaměřil jsem se na variantu, která je blíže popsána v kapitole 6.2.

6.1 NÁVRH ZE STRANY VODY

VOLBA POČTU A PRŮMĚRU TRUBEK

Ze zadání známe teplotu vstupní vody t_{48} , která se má ohřát na teplotu výstupní t_{46} . Potřebné vlastnosti vody budu určovat pro střední teplotu vody ve výměníku.

Střední teplota vody:

$$t_{stř,V} = \frac{t_{48} + t_{46}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.1)$$

$$t_{stř,V} = \frac{47 + 50}{2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{stř,V} = \underline{48,5} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Vlastnosti vody pro střední teplotu:

ρ_V	=	998	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota
ν_V	=	$0,556 \cdot 10^{-6}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematický viskozita
$c_{p,V}$	=	4180	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
η_V	=	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	dynamická viskozita
λ_V	=	0,6472	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti

Objemový průtok vody výměníkem:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{\dot{m}_{48}}{\rho_v} & [m^3 \cdot s^{-1}] & (6.2) \\ \dot{V} &= \frac{7,835}{998} & [m^3 \cdot s^{-1}] & \\ \dot{V} &= \underline{0,00785} & [m^3 \cdot s^{-1}] & \end{aligned}$$

Počet trubek výměníku závisí na zvolené rychlosti proudění vody a průměru trubky. V následující tabulce 6.1 uvádím krátký výčet variant.

w_v [$m \cdot s^{-1}$]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
S [m^2]	0,03925	0,03925	0,03925	0,03925	0,01963	0,01963	0,01963	0,01963
D [mm]	17,2	21,3	26,9	33,7	17,2	21,3	26,9	33,7
T [mm]	1,8	2	2	2,3	1,8	2	2	2,3
d [mm]	13,6	17,3	22,9	29,1	13,6	17,3	22,9	29,1
S_1 [m^2]	0,00015	0,00024	0,00041	0,00067	0,00015	0,00024	0,00041	0,00067
n [1]	270,2	166,9	95,3	59,0	135,1	83,4	47,6	29,5

Tab. č.6.1 Výčet variant na straně vody

Kde	w_v [$m \cdot s^{-1}$]	střední rychlost proudění vody v trubce
	S [m^2]	celková průtočná plocha
	D [mm]	vnější průměr trubky
	T [mm]	tloušťka stěny trubky
	d [mm]	vnitřní průměr trubky
	S_1 [m^2]	průtočná plocha jedné trubky
	n [1]	počet trubek

Volím variantu pro střední rychlost proudění vody $w_v = 0,2$ [$m \cdot s^{-1}$], průměr trubky $D = 26,9$ [mm], počet trubek $n = 95,3$. Z důvodu dobré dělitelnosti počtu trubek pro geometrické uspořádání, budu uvažovat počet trubek **$n = 96$** .

Příklad výpočtu pro zvolenou variantu:

$$S = \frac{\dot{V}}{w} \quad [m^2] \quad (6.3)$$

$$S = \frac{0,00785}{0,2} \quad [m^2]$$

$$S = \underline{0,0392} \quad [m^2]$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot 10^6} \quad [m^2] \quad (6.4)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot 22,9^2}{4 \cdot 10^6} \quad [m^2]$$

$$S_1 = 0,00041 \quad [m^2]$$

$$n = \frac{S}{S_1} \quad [1] \quad (6.5)$$

$$n = \frac{0,0392}{0,00041} \quad [1]$$

$$n = \underline{95,3} \quad [1]$$

VÝPOČET SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA α_v

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_v při podélném proudění se určí ze vztahu

$$\alpha_v = 0,023 \cdot \frac{\lambda_v}{d_e} \cdot \left(\frac{w_v \cdot d_e}{\nu_v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (6.6)$$

kde $\lambda_v [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti, $\nu_v [m^2 \cdot s^{-1}]$ je součinitel kinematické viskozity, $w_v [m \cdot s^{-1}]$ je střední rychlost proudu, $Pr [1]$ je Prandtlovo číslo(2). Všechny parametry se určují pro střední teplotu proudu. Ekvivalentní průměr $d_e [m]$ při proudění uvnitř trubek je roven vnitřnímu průměru trubky. $C_t [1]$ je opravný koeficient závislý na teplotě proudu a stěny, $C_l [1]$ je oprava na poměrnou délku, $C_m [1]$ se zavádí jen při proudění danálem řešeným jako mezikruží. Koeficienty C_l a C_m mají hodnotu 1.

Prandtlovo číslo:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_V \cdot c_{p,V}}{\lambda_V} \quad [1] \quad (6.7)$$

$$\text{Pr} = \frac{5,55 \cdot 10^{-4} \cdot 4180}{0,6472} \quad [1]$$

$$\text{Pr} = \underline{3,58} \quad [1]$$

Opravný koeficient C_t :

$$C_t = \left(\frac{\eta_V}{\eta_{V,ST}} \right)^n \quad [1] \quad (6.8)$$

kde $\eta_{V,ST}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] je dynamická viskozita vody při teplotě stěny trubky.

Teplotu stěny odhaduji $t_{ST} = 60$ [$^{\circ}\text{C}$], této teplotě odpovídá dynamická viskozita vody $\eta_{V,ST} = 4,8 \cdot 10^{-4}$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]. Při ohřevu je exponent $n = 0,11$.

$$C_t = \left(\frac{5,55 \cdot 10^{-4}}{4,8 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,11} \quad [1]$$

$$C_t = \underline{1,0161} \quad [1]$$

dosadím do rovnice (6.6)

$$\alpha_V = 0,023 \cdot \frac{0,6472}{0,0229} \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 0,0229}{5,56 \cdot 10^{-7}} \right)^{0,8} \cdot 3,58^{0,4} \cdot 1,0161 \cdot 1 \cdot 1 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_V = \underline{1494} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Jelikož se v diplomové práci vyskytují citlivé výsledky řešení, které jsou duševním vlastnictvím spolupracující firmy VPE, uvádím je ve zvláštní příloze. Jedná se o kapitoly 6.2, 6.3 a 7.

8 ZÁVĚR

Úkolem bylo navrhnout separační ohřívák vody. Abych mohl tento výměník tepla navrhnout, musel jsem nejdříve vypočítat vlastnosti spalin vystupujících z kogeneračních jednotek TEDOM. Spaliny jsou využity jako zdroj energie pro vyvíjený FES, jehož je mnou navrhovaný SeOV součástí. Před samotným návrhem SeOV jsem propočítal FES ze zadaných hodnot, tak bych získal parametry pvs na vstupu navrhovaného výměníku. V rozhodování, jaký druh výměníku zvolit, jsem zohlednil fakt, že topné médium je parovzduchová směs, která při nižším výkonu kogeneračních jednotek bude kondenzovat. Rozhodl jsem se pro konstrukci výměníku uvedenou v kapitole 6. Jedná se o protiproudé zapojení výměníku chlazeného vodou. Výměník je opatřen konstrukcí pro průběžný záchyt kondenzátu. Odseparovaný kondenzát je sveden na stěnu kanálu a neovlivňuje přestup tepla na níže položené teplosměnné ploše. Teplosměnná plocha výměníku je z nerezové oceli, stejně jako stěny kanálu. Výstupní část výměníku na straně pvs může být vyrobena z obyčejné oceli např. třídy 10, pokud bude z vnitřní strany ošetřena pogumováním, nebo jinou ochranou, aby separovaný kondenzát nedegradoval materiál. Konstrukce pro svod kondenzátu je z tenkého ohýbaného plechu svařena a následně celá pozinkována. Před výstup pvs z výměníku je umístěn žaluziový odlučovač, který brání strhávání kapek proudem pvs do potrubí. Konstrukce výměníku je z vnější strany navržena tak, aby mohla být tepelně zaizolována a oplechována v souladu s normou.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VILIMEC, Ladislav; STÁREK, Kamil. FES - Flexibilní energetický systém se zvýšenou účinností transformace primární energie tuhých i alternativních paliv a tepla odpadních spalin. All for power. 2008, 02/2008, s. XXIII-XXV. ISSN 1802-8535.
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalínových výměníků. vyd. 1. Praha : ČVUT, Fakulta strojní, Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení, 1999. 176 s.
- [3] VÍTKOVICE POWER ENGINEERING. Výzkum a vývoj integrovaného zdroje pro bioplynové stanice s vyšší účinností výroby elektřiny s možností kogenerace projekt programu TIP, ev. č. FR-TI1/0744
- [4] Interní literatura VÍTKOVICE POWER ENGINEERING
- [5] DROBNÝ, Kamil: VÍTKOVICE – dodávka bioplynových stanic. Biom.cz [online]. 2010-03-31 [cit. 2010-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vitkovice-dodavka-bioplynovych-stanic>>. ISSN: 1801-2655.
- [6] ŠEVELOVÁ, Kamila, et al. Parní kotle [online]. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007 [cit. 2010-04-03]. Dostupné z WWW: <www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/parni-kotle.pdf>.

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	kapitola 6.2; 6.3 a 7
Příloha B	výpočtový model FES
Příloha C	schéma FES
Příloha D	Sestava SeOV
Příloha E	pozice sestavy SeOV